

不同地域海砂取代率对混凝土力学性能的影响

朱德举^{1,2,3†}, 周琳林¹, 耿健智¹, 刘志健¹, 徐振钦¹

- [1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
3. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082]

摘要:为深入研究海砂取代率对混凝土性能的影响,采用山东胶州、福建漳州、广西钦州三地原状海砂,对比研究它们与河砂混合后在物理性质上的差异.同时,三种海砂以 15%、25%、35% 和 50% 的取代率去替代河砂,研究取代率对混凝土工作性能和不同龄期下力学性能的影响.结果表明:使用海砂基本不会影响混凝土的工作性能,在 50% 取代率下海砂能够提高混凝土的流动性;随着海砂取代率的增加,混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度先增加后减小,但对弹性模量影响较小;掺入海砂优化了细骨料粒径分布,进而提高了混凝土强度.但是高取代率下海砂中贝壳等有害成分将对混凝土的力学性能造成不利影响.此外,从整体上看海砂取代率对混凝土强度的影响较小(幅度均在 10% 以内),而且在海砂取代率为 50% 时,在长龄期下混凝土的强度依然高于对照组.因此,从工程应用角度,海砂取代率在 50% 的范围内都是可行的.

关键词:海砂;取代率;混凝土;力学性能

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Effect of Replacement Rate of Sea Sand from Different Regions on Mechanical Properties of Concrete

ZHU Deju^{1,2,3†}, ZHOU Linlin¹, GENG Jianzhi¹, LIU Zhijian¹, XU Zhenqin¹

- [1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: To study the effect of the replacement rate of sea sand on the properties of concrete in-depth, this paper uses three kinds of original sea sands from Jiaozhou-Shandong, Zhangzhou-Fujian, and Qinzhou-Guangxi to compare and study the differences of their physical properties after mixing with river sands. Meanwhile, these sea sands were used to replace river sand with 15%, 25%, 35%, and 50% replacement rates to study their effects on the workability and mechanical properties of concrete at different ages. The test results show that: the use of sea sand in

* 收稿日期:2021-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1806225), National Natural Science Foundation of China (U1806225); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020GK2079), High-Tech Industry Science and Technology Innovation Leading Plan of Hunan Province (2020GK2079)

作者简介:朱德举(1978—),男,山东济宁人,湖南大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

concrete basically does not affect the workability of concrete, and the sea sand with a 50% replacement rate can improve the fluidity of concrete. With the increase of sea sand replacement rate, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete increase and then decrease, but the replacement rate has less effect on the elastic modulus; the sea sand can optimize the distribution of fine aggregate particle size and improve the strengths of concrete. However, harmful components such as shells in sea sand can adversely affect the mechanical properties of concrete at a high replacement rate. In addition, the overall effect of the sea sand replacement rate on the strength of concrete (all within 10%) is limited, and sea sand with a 50% replacement rate is still higher than the control group at long curing age. Therefore, from the engineering application point of view, the sea sand replacement rate in a range of 50% is feasible.

Key words: sea sand; replacement rate; concrete; mechanical properties

随着工程建设的高速发展,对用于制备混凝土的砂石的需求急剧增加.现有数据表明,中国砂石产量约占世界砂石产量的35%,预计2030年可达 $2.5 \times 10^{10} \text{ t}$ ^[1-2].当前,建筑用砂很大一部分还是来自河砂并且受到产地资源和生态保护等的限制^[3].因此,迫切需要开发利用其他的砂资源去替代河砂以解决建筑用砂供应短缺问题.我国海砂资源丰富,近海的海砂总量将近 $6.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[4].因此,利用海砂去完全或部分替代河砂制备混凝土是解决河砂短缺问题的有效手段.与河砂相比,海砂有相似的化学组成和物理性质,最大的差异在于海砂的表面形貌、氯盐、有机物和贝壳含量等^[5-6].这些差异会影响混凝土的工作性能^[7]、力学性能^[8-11]及耐久性^[12-15],但是通过调整配合比等手段还是可以用海砂制备出达到所需强度等级的混凝土.

在淡水和河砂资源短缺的工程建设中应用海砂,可以考虑利用海砂部分取代河砂.Limeira等^[7]研究了在15%~50%取代率下海砂对混凝土物理和力学性能的影响,发现合理粒径范围内的海砂在25%~50%取代率下可以获得与对照组相似的物理和力学性能;并且掺有海砂的C30混凝土已运用在港口路面^[16].卞立波等^[17]发现当混合砂中海砂的掺量在50%以下时,其强度会随着海砂掺量的增加而增加;当掺量大于50%时,其强度呈下降趋势.Girish等^[18]发现海砂与河砂混合可以优化细骨料的级配,掺有30%海砂的混凝土的抗压强度和抗折强度比对照组略高.海砂取代率为40%时,混凝土的抗压强度和抗折强度能提升13.4%和6.46%^[19].然而Deepak^[20]研究表明混凝土的强度会随海砂取代率的增加而逐渐降低,应该选择20%的海砂取代率以保证强度.

上述研究成果对海砂取代率的选择有一定的借

鉴性,但存在地域的局限性并且大多关注早龄期力学性能(7 d和28 d).为了进一步研究海砂取代率对混凝土性能的影响,本文考虑地域因素,以山东胶州、福建漳州、广西钦州三地原状海砂为研究对象,对比研究与河砂混合后物理性质差异以及不同海砂取代率对混凝土工作性能和不同龄期力学性能的影响,最后确定了海砂取代率的合适范围.

1 试验材料及方法

1.1 原材料

水泥采用南方牌PO 42.5普通硅酸盐水泥,水泥的化学组成见表1;粗骨料采用本地石灰岩碎石,粒径为5~20 mm,表观密度为 $2\ 624 \text{ kg/m}^3$,压碎值为9.6%;拌合用水为本地自来水;减水剂为西卡公司生产的聚羧酸型高效减水剂,性能指标见表2;使用的细骨料包括:长沙当地河砂(RS)、三地浅海地区原状海砂[山东胶州海砂(SDS)、福建漳州海砂(FJS)和广西钦州海砂(GXS)].按照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[21],对它们的物理及化学性质进行测定,结果见表3.

表1 水泥的化学组成

Tab.1 Chemical composition of cement							%
$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{SO}_3)$	
17.91	4.27	1.91	4.66	61.14	0.11	3.23	

表2 减水剂性能指标

Tab.2 Performance index of water reducer				
外观	pH	含水率/%	堆积密度/($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	减水率/%
淡黄色	10.5	4.5	0.48	22

表 3 不同砂样的物理性能及表面化学元素质量分数

Tab.3 Physical properties and surface chemical element mass fraction of various types of sand samples

样品名称	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎值/%	$w(\text{Cl}^{-1})/\%$	$w(\text{硫化物})/\%$	$w(\text{贝壳})/\%$	$w(\text{泥})/\%$	$w(\text{有机物})/\%$	细度模数
RS	1 450	2 490	3.4	—	—	—	0.9	0.4	2.91
SDS	1 460	2 610	3.1	0.012	0.11	1.85	1.6	0.8	2.72
FJS	1 440	2 440	4.2	0.013	0.10	2.43	1.9	1.0	2.32
GXS	1 420	2 610	3.0	0.091	0.12	2.12	1.4	0.8	2.47

1.2 测试方案与试件制备

1.2.1 混合砂的性能测试

海砂的取代率为 15%、25%、35% 和 50%，三种不同地域的海砂能够与本地河砂组合成 12 种混合砂。在后文中，SDS-15% 代表混合砂由 15% 的山东胶州海砂和 85% 的河砂组成，其余样品的命名类似。根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[21]对上述混合砂的表观密度、堆积密度、压碎值、粒径分布和细度模数进行测试。

1.2.2 混凝土配合比和制备流程

不同类型混凝土均采用如表 4 所示的配合比。在后文中用 OC、SD、FJ 和 GX 分别代表普通混凝土、掺有山东胶州海砂、福建漳州海砂和广西钦州海砂的混凝土。SD-15% 代表掺有 15% 山东胶州海砂的混凝土，其余样品的命名类似。

表 4 C40 混凝土的配合比

Tab.4 Proportion of C40 concrete

水灰比	$\rho_{\text{水}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{水泥}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{砂}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{碎石}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$w_{\text{减水剂}}/\%$
0.45	185	411	596	1158	1.0

所有混凝土的材料选取和制备流程均严格按照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[21]和《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)^[22]进行，尽可能避免由此带来的试验误差对力学试验结果的影响。此外，所有试件浇筑完后均放入标准养护室[温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 95\%$]养护，达到规定的龄期后进行力学性能测试。

1.2.3 混凝土力学性能测试

如表 5 所示，根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[23]以及文献[5, 24]测试不同类型混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、静力弹性模量。由于采用的试件

尺寸均为非标准尺寸，除了静力弹性模量外，立方体抗压强度、轴心抗压强度和劈裂抗拉强度的试验结果均换算成标准试件尺寸强度，尺寸换算系数分别为 0.95、0.95 和 0.85^[5, 23]。

表 5 混凝土的力学性能试验

Tab.5 Mechanical properties test of concrete

试验类型	养护龄期/d	试件尺寸/($\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$)
立方体抗压强度	7, 28, 80, 180	100×100×100
劈裂抗拉强度	28, 90, 180	100×100×100
轴心抗压强度	28	100×100×300
静力弹性模量	28	100×100×300

2 结果与讨论

2.1 砂性能测试

2.1.1 密度和压碎值

各类混合砂样的堆积密度、表观密度以及压碎值的测试结果见表 6。对照表 3，混合砂的堆积密度随海砂取代率的增加变化不大。在高取代率下，相比于 RS，掺有 SDS 的混合砂略高一些，而分别掺有 FJS 和 GXS 的混合砂有所降低，主要原因在于 SDS 的堆积密度略高于 RS 而其余两种砂与之相反。此外，由于 SDS 和 GXS 的表观密度大于 RS 而 FJS 与之相反，所以掺有 SDS 和 GXS 的混合砂的表观密度高于 RS 并随着取代率的增加而增加，掺有 FJS 的混合砂则与之相反。另外，RS、SDS 和 GXS 的压碎值差异不大，所以混合砂随海砂取代率的变化也不大。而 FJS 明显高于三者，因此在高取代率下，掺有 FJS 的混合砂的压碎值高于河砂。

2.1.2 颗粒级配及细度模数

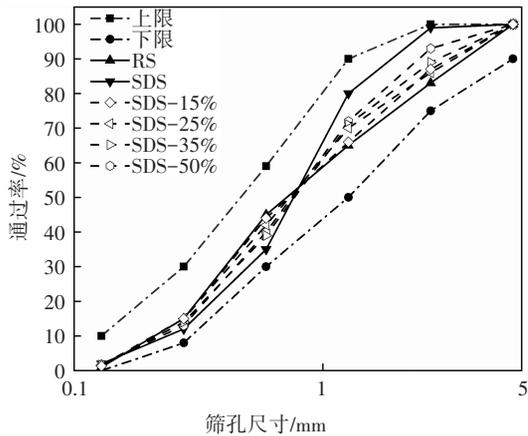
如图 1 和表 7 所示，各混合砂样的粒径分布(图中通过率为质量通过率)和细度模数均随海砂掺量而变化，均介于河砂与海砂之间。其次，所有混合砂的级配均连续，符合 JGJ 52—2006^[21]对于混凝土用

细骨料的规定,属于 II 区中砂. 另外,海砂的掺入优化了河砂的粒径分布,弥补了河砂某一粒径含量不足的缺陷. Limeira 等^[7]和 Girish 等^[18]的试验中也有类似的发现.

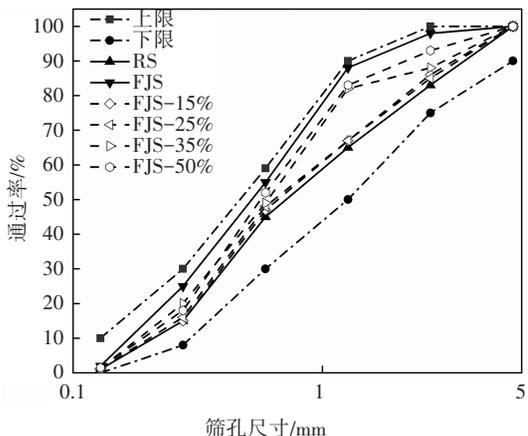
表 6 混合砂的物理性质

Tab.6 Physical properties of mixed sand samples

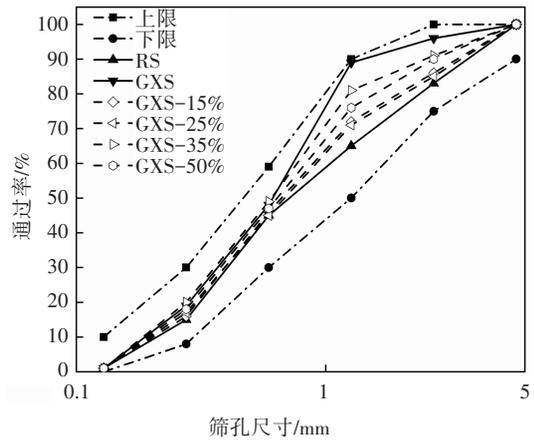
样品名称	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎值/%
SDS-15%	1 450	2 500	3.4
SDS-25%	1 450	2 520	3.3
SDS-35%	1 460	2 540	3.3
SDS-50%	1 460	2 570	3.3
FJS-15%	1 450	2 490	3.5
FJS-25%	1 450	2 470	3.7
FJS-35%	1 450	2 470	3.7
FJS-50%	1 440	2 450	4.0
GXS-15%	1 450	2 510	3.4
GXS-25%	1 440	2 530	3.2
GXS-35%	1 440	2 550	3.2
GXS-50%	1 440	2 560	3.2



(a) SDS 组



(b) FJS 组



(c) GXS 组

图 1 各类砂样的粒径分布曲线

Fig.1 Grain size distribution curves of various types of sand samples

表 7 各类砂样的细度模数

Tab.7 Fineness modulus of various types of sand samples

样品名称	细度模数
SDS-15%	2.87
SDS-25%	2.86
SDS-35%	2.85
SDS-50%	2.80
FJS-15%	2.84
FJS-25%	2.83
FJS-35%	2.60
FJS-50%	2.53
GXS-15%	2.79
GXS-25%	2.81
GXS-35%	2.58
GXS-50%	2.68

2.2 混凝土的工作性能

混凝土的工作性能采用坍落度来表征. 图 2 展示了 C40 普通混凝土与所有掺有海砂的混凝土的坍落度测试结果.

图 2 表明各新拌混凝土坍落度均可达到(200 ± 20) mm, 能够满足工程需求. 结合表 7 中各类砂样的细度模数, 可以发现随着细度模数的降低, 混凝土的坍落度先增加后减小. 当细度模数在 2.8~2.9 范围内时, 掺有海砂的混凝土的坍落度均高于 OC(河砂细度模数为 2.91, 见表 3). 这表明海砂取代率较低时, 海砂的掺入改善了细骨料级配, 使混合砂的细度模

数更合理,进一步改善了工作性能.然而,随着海砂替代率的增加,混合砂中细颗粒较多,细度模数将低于合理值,骨料比表面积增大,需要更多的浆体来包裹,此时混凝土坍落度会降低.相比于其他组,FJS-50%组的细度模数最低,相应的混凝土坍落度最低.此外,海砂中的贝壳等物质也会降低混凝土的流动性.由于FJS和GXS中贝壳含量高于SDS,因此在高海砂取代率下FJ组和GX组的坍落度均低于SD组.

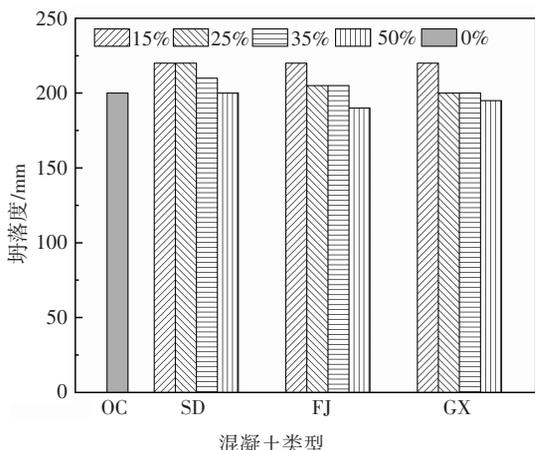


图 2 各类混凝土的坍落度

Fig.2 Slump of various types of concrete

2.3 混凝土的力学性能

对不同海砂(SDS、FJS和GXS)制备的混凝土和OC进行力学性能测试.不同龄期的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量的测试结果如表8所示.

2.3.1 抗压强度

表8和图3表明在大多数情况下,海砂的掺入对混凝土的抗压强度均有不同程度的提高.当养护龄期为7d时,掺有不同地域海砂的混凝土较OC抗压强度的变化幅度介于-5.5%~8.5%,其中当海砂替代率达到35%时,抗压强度达到最大并且相对于OC的平均涨幅在4.8%以上.当养护龄期为28d或更长时,SD组、FJ组和GX组的抗压强度也均高于OC.以180d为例,掺有不同地域海砂的混凝土较OC抗压强度的增长幅度介于0.7%~6.4%.海砂提高混凝土抗压强度的原因主要有:

1)根据Donza等^[25]和Limeira等^[7]的研究,海砂对于混凝土抗压强度的贡献一部分来源于海砂本身的强度以及海砂颗粒的表面形貌.如表3所示,除了FJS以外,SDS和GXS的压碎值小于RS,这表明SDS和GXS能发挥自身强度优势以提高混凝土的强度.另外,图4表明三种海砂与河砂颗粒形貌比较相似,但海砂的表面粗糙度较大,尤其是SDS和GXS.Zhao等^[3]和Wang等^[10]均指出具有粗糙表面的海砂能够优化界面过渡区的力学性能,对提升混凝土强度起到了积极作用.

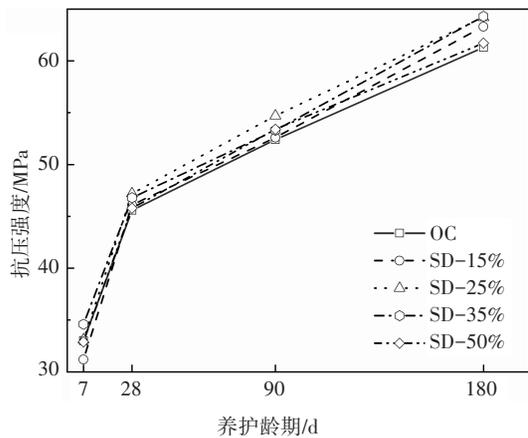
2)图1已表明海砂可改善混凝土中细骨料的级配,内部空隙得到更好的填充,从而使混凝土更加密实.

3)海砂携带的氯离子促进了水泥水化,提高混凝土早期强度.生成的Friedel盐等产物将填充混凝土内部孔隙,对提升混凝土强度也有一定的帮助^[17].

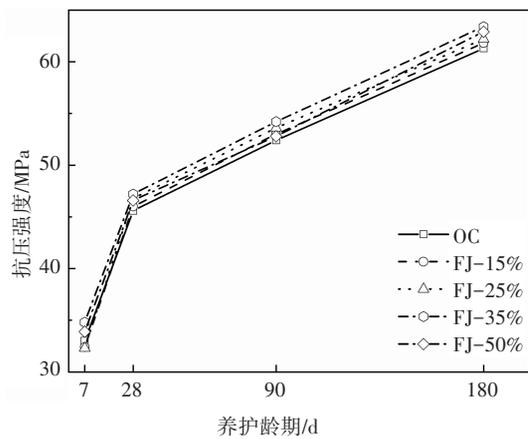
表 8 不同海砂取代率下混凝土的力学性能

Tab.8 Mechanical properties of concrete with different sea sand replacement rates

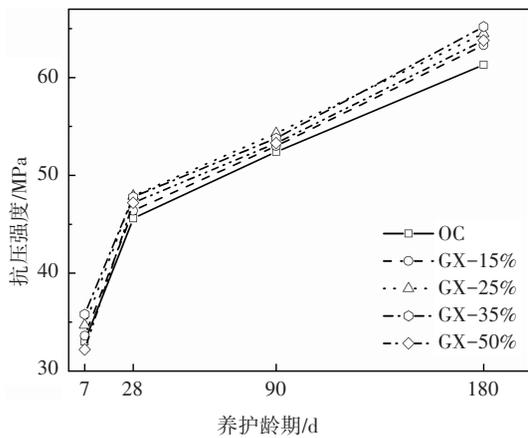
试件名称	立方体抗压强度/MPa				劈裂抗拉强度/MPa			弹性模量/GPa
	7 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d
OC	33.0	45.6	52.4	61.3	3.7	4.5	4.7	37.2
SD-15%	31.2	46.1	52.6	63.3	3.7	4.6	4.8	36.1
SD-25%	33.1	47.2	54.7	64.2	3.9	4.5	4.7	38.3
SD-35%	34.6	46.8	53.3	64.3	4.0	4.7	4.8	37.9
SD-50%	32.9	45.8	53.4	61.7	3.8	4.6	4.7	37.1
FJ-15%	32.4	46.0	53.0	61.8	3.7	4.6	4.8	37.8
FJ-25%	32.3	46.8	53.6	62.2	3.9	4.7	4.7	38.5
FJ-35%	34.8	47.2	54.2	63.4	4.1	4.8	4.9	39.2
FJ-50%	33.9	46.6	52.8	62.9	3.8	4.5	4.8	37.7
GX-15%	33.6	46.4	53.0	63.3	3.9	4.6	4.8	36.5
GX-25%	34.7	47.9	54.3	64.5	3.8	4.7	4.9	37.9
GX-35%	35.8	47.8	53.8	65.2	4.0	4.8	4.9	37.6
GX-50%	32.2	47.2	53.3	63.8	3.7	4.6	4.8	37.2



(a)SD组

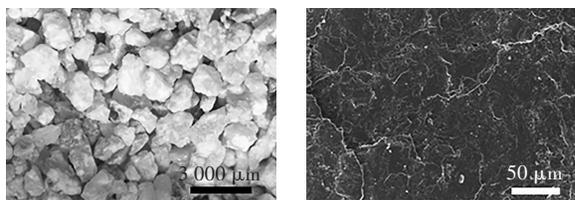


(b)FJ组

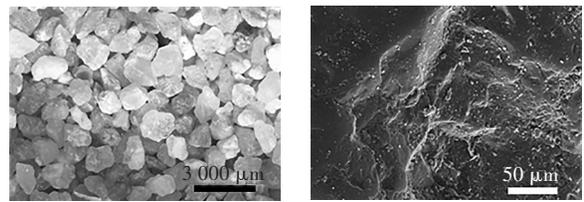


(c)GX组

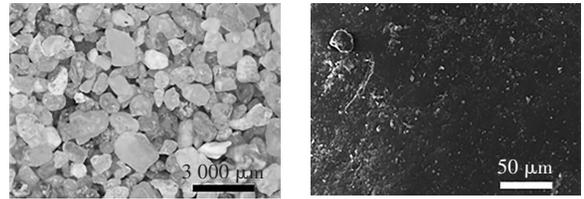
图3 不同龄期下各类混凝土的立方体抗压强度
Fig.3 Cubic compressive strength of various types of concrete at different curing age



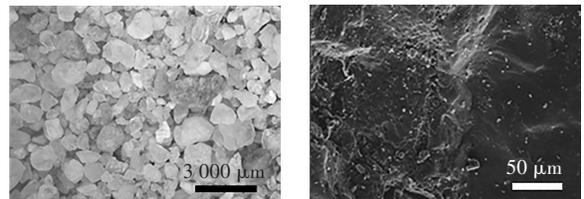
(a)RS



(b)SDS



(c)FJS



(d)GXS

图4 不同砂样的表观形貌

Fig.4 Apparent morphology of different sand samples

另外,通过分析不同龄期下SD组、FJ组和GX组中抗压强度与海砂替代率的变化趋势,发现混凝土强度随海砂替代率的增加均呈先增加后降低的趋势,且都在掺量25%或35%时达到最高值.造成这一现象的原因可能是当海砂替代率较低时,海砂对细骨料级配的优化作用对混凝土强度的提升占据主导地位.然而,随着海砂替代率的增大,海砂引入的贝壳含量也随之增加,贝壳的低强度以及与混凝土基体较弱的黏结力将导致混凝土强度降低^[26-27].

本文还对比了不同掺量下不同地域海砂混凝土28 d立方体抗压强度的变化情况,如图5所示.可以发现,不同地域海砂的掺量为15%、25%、35%和50%时,混凝土强度相差不大,最大强度差分别为0.4 MPa、1.1 MPa、1 MPa和1.4 MPa.这也进一步验证了海砂对混凝土立方体抗压强度的提升主要还是源于海砂对细集料级配的优化作用.不同地域海砂本身的差异对混凝土强度的影响较小,尤其是在低掺量下.此外,不同海砂掺量下GX组的强度略高于其余两组,主要原因在于GXS的压碎值最低,且氯离子含量远高于FJS和SDS(详见表3).

此外,通过表8和图3还能发现不同海砂取代率对混凝土抗压强度的变化幅度(增加或降低)相比于对照组均不超过10%,并且在长龄期下当海砂取代率为50%时,混凝土的抗压强度依然高于对照组.这

说明从整体上看,海砂取代率对混凝土抗压强度的影响并不明显.因此,从工程应用角度,海砂取代率在 50% 范围内都是可行的.

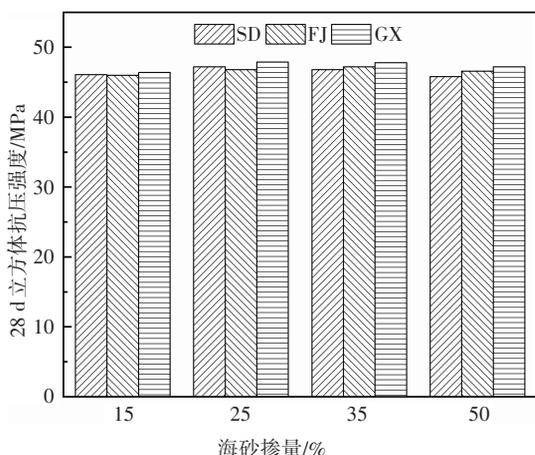


图 5 SD组、FJ组和GX组的 28 d 立方体抗压强度

Fig.5 28 d cubic compressive strength of SD group, FJ group and GX group

2.3.2 劈裂抗拉强度

OC、SD 组、FJ 组和 GX 组的混凝土劈裂抗拉测试结果见表 8. 由表 8 可见,掺有海砂的混凝土的劈裂抗拉强度均不小于 OC. 养护龄期为 28 d、90 d 和 180 d 时,海砂对混凝土劈裂抗拉强度的最大提升幅度分别为 10.8%、6.6% 和 4.3%,劈裂抗拉强度的增长幅度随龄期增长逐渐降低.此外,SD 组、FJ 组和 GX 组的混凝土不同龄期劈裂抗拉强度均在海砂取代率为 35% 时达到最大值.这个趋势与抗压强度的发展趋势一致.

2.3.3 弹性模量

各组混凝土弹性模量的测试结果如图 6 所示(图中虚线代表 OC 的弹性模量),可以发现 SD 组、FJ 组和 GX 组的混凝土弹性模量与 OC 相比无明显的规

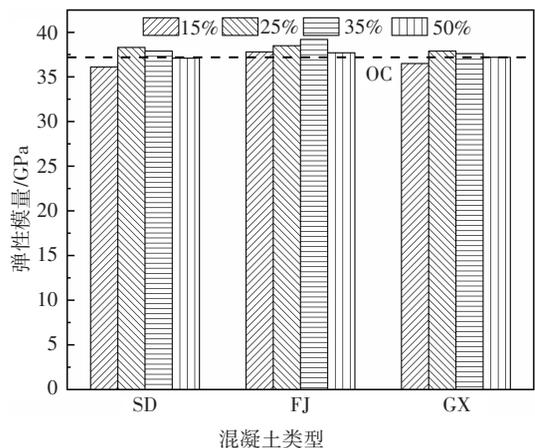


图 6 各组混凝土的弹性模量

Fig.6 Elastic modulus of various groups of concrete

律性.海砂对混凝土弹性模量影响较小.当取代率为 25%~35% 时,混凝土的弹性模量略微提高.刘伟等^[5]也得到类似的结果.其原因是混凝土的弹性模量主要依赖于粗骨料的相对体积和硬度,而本研究中采用相同的粗骨料.

3 结论

本文以 15%、25%、35% 和 50% 的海砂取代率将山东胶州、福建漳州、广西钦州三地原状海砂与河砂混合制备混凝土,系统研究了海砂取代率对混凝土工作性能和力学性能的影响,主要结论如下:

1)海砂的掺入不会影响混凝土的工作性能.在选取的三种海砂中,取代率不超过 50% 时,均能提高混凝土的流动性.

2)海砂的掺入能够提高混凝土的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,并且两者均随着海砂取代率的增加呈先增加后降低的趋势.取代率在 25%~35% 时抗压强度均达到最大值.劈裂抗拉强度在取代率为 35% 时达到最大值.

3)海砂的掺入对混凝土的弹性模量无明显影响.取代率为 25%~35% 时混凝土的弹性模量略高于 OC.

4)从工程应用角度,混凝土的海砂取代率在 50% 范围内都是可行的.

参考文献

[1] 周继凯,何旭,王泽宇,等.海水海砂混凝土与潜在危害研究进展[J].科学技术与工程,2018,18(24):179-187.
ZHOU J K, HE X, WANG Z Y, *et al.* Research progress on seawater and sea sand concrete and its potential hazards [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (24) : 179-187. (In Chinese)

[2] 李师财,于泳,金祖权.海水海砂混凝土力学性能与耐久性研究综述[J].硅酸盐通报,2020,39(12):3743-3752.
LI S C, YU Y, JIN Z Q. Review on mechanical properties and durability of seawater and sea-sand concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(12):3743-3752. (In Chinese)

[3] ZHAO Y F, HU X, SHI C J, *et al.* A review on seawater sea-sand concrete: mixture proportion, hydration, microstructure and properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 295: 123602.

[4] 王圣洁,刘锡清,戴勤奋,等.中国海砂资源分布特征及找矿方向[J].海洋地质与第四纪地质,2003,23(3):83-89.
WANG S J, LIU X Q, DAI Q F, *et al.* Distribution characteristics of marine aggregate resources and potential prospect in China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23 (3) : 83-89. (In

- Chinese)
- [5] 刘伟,谢友均,董必钦,等.海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J].硅酸盐通报,2014,33(1):15-22.
LIU W, XIE Y J, DONG B Q, *et al.* Study on characteristics of dredged marine sand and the mechanical properties of concrete made with dredged marine sand [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1): 15-22. (In Chinese)
- [6] LIU W, CUI H Z, DONG Z J, *et al.* Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 1-9.
- [7] LIMEIRA J, ETXEBERRIA M, AGULLÓ L, *et al.* Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11): 4165-4174.
- [8] GUO M H, HU B, XING F, *et al.* Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117339.
- [9] DHONDY T, REMENNIKOV A, NEAZ SHEIKH M. Properties and application of sea sand in sea sand-seawater concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(12): 04020392.
- [10] WANG Y J, ZHANG C H, WANG J T, *et al.* Experimental study on foci development in mortar using seawater and sand [J]. Materials, 2019, 12(11): 1799.
- [11] 单波,王志鸿,肖岩,等. RPC管-海水海砂混凝土组合柱抗压性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 104-112.
SHAN B, WANG Z H, XIAO Y, *et al.* Compression performance of seawater and sea sand concrete filled RPC tube composite columns under axial load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 104-112. (In Chinese)
- [12] LI T, LIU X Y, ZHANG Y M, *et al.* Preparation of sea water sea sand high performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119114.
- [13] ZHOU J K, HE X, ZHANG L C. CT characteristic analysis of sea-sand concrete exposed in simulated marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121170.
- [14] HE X, ZHOU J K. Mechanical characteristics of sea-sand concrete in simulated marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 122098.
- [15] ZHU N S, JIN F N, KONG X L, *et al.* Interface and anti-corrosion properties of sea-sand concrete with fumed silica [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 1085-1091.
- [16] LIMEIRA J, AGULLO L, ETXEBERRIA M. Dredged marine sand in concrete: an experimental section of a harbor pavement [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 863-870.
- [17] 卞立波,宋少民,李飞.海砂混凝土耐久性能研究[J].混凝土与水泥制品, 2012(2): 11-14.
BIAN L B, SONG S M, LI F. Research on durability of concrete with sea sand [J]. China Concrete and Cement Products, 2012(2): 11-14. (In Chinese)
- [18] GIRISH C G, TENSING D, PRIYA K L. Dredged offshore sand as a replacement for fine aggregate in concrete [J]. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, 2015, 8(3): 88-95.
- [19] KUMAR B N N, KUMAR P K, BABU E R, *et al.* An experimental study on sea sand by partial replacement of sea sand in concrete [J]. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 2016, 2(2): 181-184.
- [20] DEEPAK W S. Effect on compressive strength of concrete using sea sand as a partial replacement for fine aggregate [J]. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015, 4(6): 180-183.
- [21] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 19-49.
Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 19-49. (In Chinese)
- [22] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 5-8.
Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 5-8. (In Chinese)
- [23] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 12-25.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 12-25. (In Chinese)
- [24] 黄政宇,李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 47-54.
HUANG Z Y, LI S G. Study on mechanical properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 47-54. (In Chinese)
- [25] DONZA H, CABRERA O, IRASSAR E F. High-strength concrete with different fine aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(11): 1755-1761.
- [26] EZIEFULA U G, EZEJ J C, EZIEFULA B I. Properties of sea-shell aggregate concrete: a review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 287-300.
- [27] YANG E I, KIM M Y, PARK H G, *et al.* Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 758-765.